PROTOCOLO DE AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE MEMBRANAS EM PROCESSOS DE SEPARAÇÃO

G. H. A. PINTO¹, A. BERNARDO¹

¹Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química
E-mail: abernardo@ufscar.br

RESUMO: *Diante do constante avanço das membranas industriais e tendo em vista que métodos de separação concorrentes se encontram consolidados há mais tempo, sendo muitas vezes o uso de membranas descartado antes mesmo de uma análise prévia, deseja-se criar um protocolo para a avaliação do uso das membranas industriais. Tal protocolo tem como objetivo conduzir o leitor a uma análise do emprego de separação por membranas por etapas apresentadas sequencialmente, visando a simplificação da avaliação, promovendo ganhos econômicos e de tempo. Para a estruturação do protocolo, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica, coletando informações necessárias para conduzir o projeto de processos de separação com membranas e então dispendo as informações em sequência, sendo algumas vezes apresentados fluxogramas facilitando a visualização das etapas. Enfim, chega-se ao protocolo que em seis etapas de avaliação permite construir a estrutura básica de um processo de separação por membranas candidato à operação desejada.*

PALAVRAS-CHAVE: Operações unitárias; Filtração; Separação por membranas; Processos industriais.

1. INTRODUÇÃO

Em grande parte dos processos industriais ocorre a presença de impurezas que necessitam de controle. Assim se aplicam os processos de separação, responsáveis pela alteração na proporção destas impurezas. Entre os processos de separação encontra-se a separação por membranas, método que passou a ter grande destaque no cenário industrial, especialmente a partir da crise energética de 1970, segundo Habert et al (2006), pois não há necessidade de alteração de fase na separação.

Segundo Ribau-Teixeira e Rosa (1998) a separação por membranas pode ser utilizada em processos de purificação de água, separação de misturas gasosas, concentração de compostos orgânicos de baixa massa molar, esterilização de efluentes e outras finalidades. Como todo equipamento deve ser utilizado em situações específicas, o uso de membranas em processos inadequados faz com que esta etapa não atenda o seu propósito, gerando transtornos a colaboradores, retrabalho, gastos desnecessários e impactos à sociedade e meio ambiente.

Deste modo, a separação por membranas deve ser bem projetada para evitar que o produto não atenda às especificações, evitar manutenção excessiva, adequar financeiramente

o processo e principalmente, garantir o ótimo funcionamento do equipamento, proporcionando segurança para as pessoas e ambiente.

Por ser uma etapa complexa, mais que compreender vagamente a finalidade da membrana, é necessário que o projeto da etapa de separação seja bem estruturado e orientado. Deste modo, para nortear a seleção do equipamento mais adequado ao processo e simplificar a elaboração do projeto, deseja-se elaborar um protocolo que tenha tal finalidade, abordando os aspectos necessários para a avaliação do uso de membranas e, assim, gerar ganhos econômicos e de tempo.

2. METODOLOGIA

A separação por membranas é abordada como uma operação unitária e vem sendo amplamente empregada em processos industriais, como no tratamento de efluentes, por exemplo, desde os anos 1960, de acordo com Prudich et al (2008). Assim, os principais conceitos relacionados à separação são altamente difundidos e abordados nos principais livros, revistas e artigos especializados.

A abordagem usual do tema, apresentando os conceitos separadamente, em “blocos”, é útil quando se deseja simplesmente compreender as informações. Esta abordagem, porém, não favorece a avaliação da operação uma vez que, quando se deseja realizar tal avaliação é necessário que a metodologia adotada seja definida em etapas. Tais etapas devem ser colocadas em sequência, de modo que as ideias abordadas não sejam relacionadas somente com suas similares, mas também com as etapas anterior e posterior.

Deste modo, para o desenvolvimento do protocolo de avaliação, foi realizada uma ampla e profunda revisão bibliográfica. A partir da bibliografia retiram-se as informações que são essenciais para determinar a aplicação da operação unitária em processos industriais, como os critérios para selecionar ou não as membranas como candidatas à separação, classificação dos processos de separação por membrana, configuração das correntes, emprego de etapas adicionais, entre outras informações cruciais.

É possível a partir deste ponto determinar o protocolo, que permite aos projetistas se basearem em uma estrutura que seja mais interessante para a elaboração do escopo de equipamentos de separação por membranas, uma vez que um escopo bem estruturado permite a elaboração de um projeto mais sólido, sem a necessidade de alterações muito profundas. O protocolo é obtido, portanto pelo rearranjo dos principais conceitos envolvidos nas análises primárias do projeto, permitindo a apresentação através de etapas sequenciais, sendo muitas vezes apresentadas em fluxogramas, como é convencional em manuais técnicos. A estruturação em etapas sequenciais permite o ganho de tempo e por consequência o projeto se torna mais eficiente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As etapas da avaliação do uso de membranas em equipamentos de separação são apresentadas a seguir, de acordo com a sequência que devem ser adotadas.

3.1. Caracterização da Alimentação

A primeira etapa a ser realizada é a caracterização da alimentação e do produto do processo de separação. É um passo de extrema importância pois possibilita conhecer as limitações da separação por membranas frente o sistema em questão. São diversas as variáveis a serem analisadas nesta caracterização:

- Estado físico e natureza da alimentação;
- Composição da alimentação e do produto;
- Temperatura, pH e pressão;
- Presença de impurezas;

Uma caracterização bem realizada leva a uma indicação mais precisa de como conduzir a separação e atingir o resultado esperado sem grandes surpresas. A caracterização visa conhecer os resultados esperados da etapa de separação para identificar possíveis fatores que impeçam o bom funcionamento do equipamento.

3.2. Determinação do Processo Adequado

Determinadas as características da corrente de alimentação, a próxima etapa consiste na determinação do processo de separação por membrana (osmose reversa, ultrafiltração, microfiltração, separação de gases e pervaporação) que melhor se adequa ao processo analisado. Caso nenhum destes se adeque às condições, outro processo de separação deve ser empregado, como destilação, filtro manga, lavagem, absorção, entre outros processos que não serão abordados neste protocolo. Para determinar o processo adequado, tem-se o auxílio do fluxograma apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma para determinação de processo adequado de separação por membranas.

Observa-se que os principais fatores que estão relacionados à seleção do processo adequado são o estado físico da corrente que se deseja separar e as dimensões dos componentes presentes nesta corrente. O estado físico é crucial pois a separação de sólidos não é aplicável a membranas industriais.

Segundo Magalhães et al (2005), para membranas de nanofiltração, ultrafiltração e microfiltração a permeabilidade é definida pela relação entre o tamanho/forma dos solutos e a distribuição de poros das membranas, sendo assim cada um dos processos se adequa a uma faixa de dimensões. Caso a membrana seja mal selecionada ocorrem problemas operacionais, podendo não haver separação alguma ou então ocorrerem fenômenos que afetam negativamente o fluxo, como incrustação excessiva ou a formação de uma grande camada de polarização (Porter, 1972; Sablani et al., 2001) acima da superfície da membrana.

3.3. Determinação da Configuração dos Equipamentos

Determinado o processo de separação por membranas a ser utilizado, a próxima etapa consiste na determinação da configuração a ser utilizada para atender às necessidades da operação. Em outras palavras, determinar se a operação será conduzida em batelada, batelada alimentada, passagem única ou então através de um processo contínuo. Para a determinação da configuração utiliza-se como apoio o fluxograma representado pela Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma para determinação da configuração adequada dos equipamentos.

Deve-se conhecer a mistura a ser separada e também qual dos componentes presentes na mistura desperta maior interesse. Um dos pontos principais consiste na região em que o produto de interesse se encontrará após a separação. Também é importante determinar a quantidade de passagens pelo sistema para promover a separação e se tais passagens degradam o produto de interesse, como citado no trabalho de Cianci et al (2005) em que ocorre a diminuição no teor de vitamina C em suco de caju pela oxidação durante o bombeamento.

Vale destacar que pode ser mais vantajoso utilizar um processo contínuo diante de diversos equipamentos de passagem única arranjados em série, embora o arranjo em série seja empregado em situações específicas, especialmente quando o bombeamento é nocivo ao produto. Para decidir entre estes, é necessária uma análise econômica, sendo na maioria das aplicações empregada a operação contínua.

3.4. Especificação das Membranas

Para a determinação das membranas existem diferenças no modo de seleção de acordo com o processo que se está empregando. A seleção de membranas para o sistema em questão depende não só deste processo, mas também das características da alimentação e do produto.

Membranas para pervaporação: As membranas para pervaporação são as mais simples de serem selecionadas. A pervaporação é utilizada somente para separar orgânicos de água, devido à ausência de tecnologia em membranas que promova a separação de orgânicos.

Como a área da membrana utilizada depende principalmente do fluxo de permeado, quanto menor a quantidade de permeado menor será a área superficial da membrana e, como consequência, menor é o custo de instalação e manutenção do processo de separação. Assim, a membrana deve permitir a passagem do material que se encontra em menor quantidade na alimentação.

Caso a corrente seja concentrada em orgânicos, a água deve ter transporte facilitado pela membrana, utilizando-se assim uma membrana que seja hidrofílica. Existem diversas membranas com tais características, mas por atender as necessidades do processo e ser economicamente viável em relação às demais utilizam-se normalmente materiais feitos a partir de celulose.

Caso a corrente seja concentrada em água, deve haver a retenção de água na corrente concentrada, utilizando assim membranas hidrofóbicas. Existem diversos materiais hidrofóbicos, porém por serem economicamente viáveis e de fácil operação utilizam-se normalmente borrachas de silicone.

Membranas para separação de gases: Membranas que são empregadas em separação de gases devem possuir duas importantes características, alta seletividade e alta permeabilidade para o gás rápido (menor diâmetro cinético e maior difusividade), uma vez que, tanto o gás rápido quanto o gás lento atravessam a membrana. Assim é importante que a passagem do gás rápido seja mais eficiente se comparada à passagem do gás lento.

A maneira correta de se determinar a membrana mais apropriada é a obtenção dos valores da seletividade (α), que é a razão entre os coeficientes de passagem (razão entre as concentrações na corrente permeada e de alimentação) dos componentes da mistura, e da permeabilidade (ρ), razão entre fluxo através da membrana e diferença de pressão entre as regiões separadas pela membrana. As informações apresentadas no Quadro 1 ilustram os dados em questão para as membranas que apresentam melhor desempenho para o sistema oxigênio-nitrogênio. Observa-se pelos dados que a situação ideal de alta seletividade (valor maior do que 10) simultaneamente a alta permeabilidade (valor maior do que 1000 Barrer) não ocorre, sendo necessário que o leitor determine o fator mais importante no caso analisado.

Quadro 1 - Seletividade e permeabilidade do sistema O₂/N₂ para diversos polímeros.

Polímero	α (O ₂ /N ₂)	ρ (O ₂) (Barrer)
Politrimetilsilipropeno	2,0	4000
Tetrabromo-policarbonato	7,47	1,36
Politetrabutilacetona	3,0	300
Poliéster	15,3	0,00046
Politriazol	9,0	1,2
Polipirrolona	6,5	7,9

Quadro 2 – Dados para obtenção da permeabilidade e seletividade de misturas de gases

Misturas	He/N ₂	H ₂ /N ₂	H ₂ /CH ₄	O ₂ /N ₂	He/O ₂	CO ₂ /CH ₄	H ₂ /CO ₂
log k	4,097	4,724	4,268	5,590	3,663	6,031	3,079
m	1,024	1,528	1,211	5,800	1,295	2,626	1,936

Caso não se disponha dos valores para o sistema em questão realizam-se ensaios para a membrana que se está avaliando em relação à mistura de gases. Estes ensaios determinam uma reta superior aos pontos do logaritmo da permeabilidade em função da seletividade (Equação 1). Para uma grande variedade de sistemas, as informações necessárias para a obtenção destas retas já foram obtidas por Robeson (1991), como representado no Quadro 2. Vale destacar que a separação de gases é empregada apenas em misturas binárias pois seriam necessários diversos equipamentos em série para purificar um dos gases.

As retas são obtidas através da Equação 1, sendo a permeabilidade calculada em Barrer, unidade específica para permeabilidade de membranas, e a seletividade adimensional. Os dados para “log k” e “m” são obtidas em quadros como o já apresentado acima, Quadro 2.

$$\log \rho_i = \log k - m \log \alpha_{ij} \quad (1)$$

A constante “k” pode ser interpretada como a permeabilidade da mistura quando não ocorre separação, quando as concentrações na alimentação e no produto são as mesmas e a seletividade é 1. Ainda, Robeson (1991) destaca que existe uma tendência entre o valor de “m” e a diferença entre os diâmetros moleculares (cinéticos) das substâncias envolvidas na separação. Os materiais mais comuns para membranas em separação de gases são os polímeros vítreo, caracterizados pela alta seletividade, e as borrachas, caracterizadas pela alta permeabilidade. Também há a possibilidade de utilizar zeólitas, que mesmo sendo pouco difundidas em comparação a outros materiais, de acordo com o trabalho de Kosinov et al (2016), vêm ganhando espaço devido à grande diminuição do seu custo de fabricação.

Como a permeabilidade é inversamente proporcional à pressão transmembrana, diferença de pressão entre as regiões separadas pela membrana, a espessura da membrana afeta diretamente a permeabilidade. Assim, para que a membrana possa ser operada sem grandes dificuldades ela deve possuir uma espessura próxima de 50 nanômetros, de acordo com Prudich et al (2008), para que não seja deformada ou apresente muita resistência ao transporte. Logo, ao se selecionar a membrana, avalia-se para que a membrana apresente tal espessura sem apresentar área superficial com dimensões exageradas.

De acordo com Paul e Yampol'skii (1994), a busca por membranas que componham um sistema viável de separação encontra diversos obstáculos, tanto econômicos quanto operacionais, principalmente pelo limite operacional, de temperatura e compatibilidade química, das membranas poliméricas.

Ainda assim, por requerer baixa quantidade de energia, existe o interesse em realizar pesquisas nesta área como, por exemplo, o trabalho de Rezakazemi et al (2014), que alcançou bons resultados ao se incorporar elementos inorgânicos formando as membranas de matriz mista, MMMs, superando assim os limites das membranas orgânicas.

Membranas para osmose reversa e nanofiltração: A osmose reversa é altamente empregada no tratamento de água em regiões desérticas, cujo emprego é amplamente abordado no trabalho de Eisenberg e Middlebrooks (1986). Membranas de osmose reversa são caracterizadas pela alta retenção de sal, enquanto as membranas de nanofiltração possuem como característica uma alta retenção de orgânicos. Ambas devem possuir alta rigidez mecânica para suportar a pressão aplicada na alimentação, resistência química aos íons presentes na interface, baixo custo de aquisição e alta capacidade. Ambos sistemas devem operar em condições de baixa incrustação.

As membranas para osmose reversa são usualmente polímeros de celulose e poliamidas aromáticas, ou ainda compósitos de poli(éter/amida) e poli(éter/ureia), denominados TFC (do inglês, *thin film composite*). Para se realizar a seleção dentre estes materiais analisa-se a resistência química para os componentes da alimentação.

Enquanto os polímeros de celulose trabalham bem com concentração de cloro inferior a 1ppm, o TFC só apresenta resistência a este íon em concentrações inferiores a 0,05. TFC possui como vantagem em relação aos polímeros de celulose a faixa de pH que permite a separação, enquanto o TFC trabalha bem na faixa de pH entre 3 e 11 os polímeros de celulose operam bem na faixa entre 3 e 6.

Membranas de nanofiltração diferem da osmose reversa por serem carregadas negativamente, para promover a retenção de ânions com grande eficiência, especialmente ânions polivalentes.

Membranas para microfiltração: As aplicações com microfiltração correspondem à maior parte do mercado de membranas. Existem diversos materiais que podem ser utilizados em microfiltros, como materiais poliméricos, cerâmicos e até mesmo metais sinterizados. A abrangência é tamanha que para um mesmo processo existem diversas membranas capazes de realizar a sua separação.

Existem duas classificações de membranas de microfiltração, as membranas de poros tortuosos e as membranas de poros capilares. De acordo com Lucas (2009), a principal característica da membrana de microfiltração é o diâmetro de retenção, determinado por diversos testes, como a microscopia eletrônica, a extrusão de mercúrio e técnicas ultrassônicas. No entanto, pela simplicidade, usualmente se realiza o teste chamado “teste do ponto de bolha”. A membrana é preenchida com um líquido e é feita a passagem de ar ou nitrogênio no sentido normal à superfície da membrana, obtendo a distribuição dos poros ativos presentes na membrana. Para selecionar a membrana adequada deve-se observar principalmente estes diâmetros para determinar se o soluto será retido, analisar a resistência química da membrana e também a permeabilidade do solvente.

Como não existe uma simetria na distribuição dos poros, as faces da membrana possuem poros com tamanhos distintos. Tal fato pode acarretar problemas, havendo uma convenção para se determinar o posicionamento da membrana em relação à alimentação para evitar obstrução dos poros e diminuição no desempenho da membrana. Caso o soluto possua tamanho relativamente pequeno a membrana é posicionada de modo que a superfície com menores poros esteja em contato com a alimentação, caso o tamanho seja relativamente grande esse posicionamento é invertido.

De acordo com Cheryan (1998), quanto maior o poro, maior é o fluxo inicialmente observado, porém, poros com grandes dimensões apresentam em maior proporção o fenômeno de entupimento, causando uma queda brusca no fluxo após o início da operação. Assim, procura-se empregar membranas com poros com dimensões razoáveis, descartando os maiores diâmetros.

Alguns sistemas de microfiltração possuem mecanismo para promover a remoção de material preso à superfície da membrana, sendo mais comum a passagem de solvente ou ar no sentido oposto à corrente permeada.

Membranas para ultrafiltração: Para realizar a seleção das membranas utiliza-se como critério o limite nominal de peso molecular, NMWL. Ao se selecionar a membrana para o processo, seu NMWL deve possuir valor em torno de 20 a 30% do peso molecular do soluto

a ser retido, de acordo com Prudich et al (2008). Seu valor é normalmente apresentado pelos fabricantes de membranas para ultrafiltração, porém, caso não se disponha desta informação é necessária a realização de ensaios em algumas membranas.

De acordo com Cabasso (1980), é necessária em diversas ocasiões a modificação da superfície de membranas hidrofóbicas, como em membranas de polietersulfona (PES), para garantir um caráter hidrofílico e diminuir as perdas de material. As membranas também podem ser formadas por diversos materiais, como fluoreto polivinidileno, PVDF e polímeros de celulose. O Quadro 3 representa as principais aplicações da ultrafiltração em processos industriais.

3.5. Seleção de Módulos

A seleção dos módulos depende de uma série de fatores. Para operações com vazão normal, por convenção, são utilizados módulos de discos em série, uma vez que são os módulos que possuem maior facilidade de operação, dimensionamento, aumento de escala e também por possuírem uma elevada resistência para sustentar a membrana. Contudo, cabe ressaltar que apenas para microfiltração há um número significativo de aplicações que utilizam a vazão normal.

Quadro 3 - Características e modo de operação de algumas membranas para diversos processos industriais

Aplicação	Membrana	Módulo	Sistema	Limitações
Recuperação de tintas	PES	Fibras	Contínuo	Custo, entupimento
Soro de leite	PES	Espiral	Contínuo	Custo
Biológicos	Celulose, PES, PVDF	Quadros	Batelada, Filtração de vazão normal	Recuperação
Tratamento da água	PES	Fibras	Contínuo, passagem única	Custo
Processamento de sucos	PES, PVDF	Tubos	Batelada	Entupimento, custo

Para operações com vazão tangencial, têm-se à disposição três tipos mais comuns de módulos, o módulo de quadros, módulo de fibras e módulo espiral e para fazer sua seleção utiliza-se o fluxograma representado pela Figura 3.

Como se observa, para operações com fluxos menores empregam-se módulos de quadros por possuírem menor empacotamento evitando que o módulo possua dimensões tão

inferiores que impossibilite seu manuseio. Para operações com alto fluxo ocorre o contrário, empregam-se módulos de fibras, com maior empacotamento, evitando que possuam dimensões exageradas. Para fluxos intermediários é necessário analisar a necessidade de recompressão, uma vez que, de acordo com Prodeur et al (2008), o módulo espiral apresenta a maior queda de pressão (5 a 15 psi/módulo) e menor custo de aquisição (40 a 200 US\$/m²) se comparado ao módulo de fibras (queda mesmo sendo relativamente mais caro, de 1 a 5 psi/módulo e custo de 200 a 900 US\$/m²). Assim, caso a queda de pressão influencie o processo a ponto de haver a necessidade de empregar um compressor após a filtração, utiliza-se o módulo de fibras para eliminar tal processo adicional.

Figura 3 - Fluxograma para determinação dos módulos com vazão tangencial

Mesmo sendo estes os módulos mais simples, existem outros com estruturas complexas e bom desempenho que vêm sendo desenvolvidos ao longo dos últimos anos. É o módulo de fibra oca com contator, descrito no trabalho de Pabby e Sastre (2013) que apresenta grandes vantagens pela capacidade flexível, não haver separação de fases, pequeno peso e volume, e também pelas altas razões entre fases.

3.6. Equipamentos Adicionais e Problemas Operacionais

Após a determinação do módulo avalia-se a utilização de equipamentos adicionais para contornar os efeitos negativos de certos fenômenos. É importante que ao modificar as características da alimentação não ocorram prejuízos ao processo.

De acordo Sablani et al (2001) a membrana pode operar com limites de fluxos, chamados de fluxo crítico e fluxo limitante, determinados por modelos teóricos ou experimentais, como por exemplo, a teoria de renovação de superfície e métodos de ressonância magnética. Deve-se então adequar o fluxo entre o crítico e o limitante, empregando módulos em paralelo, válvulas para ajustar vazão, por exemplo.

Outro fenômeno que afeta negativamente o fluxo é o entupimento dos poros da membrana por materiais presentes na alimentação, como coloides, sais, entre outros. O trabalho de Al-Ahmad et al (2000) aborda o entupimento com elementos biológicos, como bactérias, descrevendo inclusive fenômenos de corrosão provocados pelo fenômeno. Também são descritas ferramentas de amenização dos impactos do entupimento, como pré-tratamento com filtros de areia, floculação e adequação da temperatura, além da limpeza periódica e apropriada da membrana, feita normalmente com soluções com surfactantes e biocidas a altas temperaturas.

Ho e Sirkar (2001) apresentam um conceito que pode ser definido como “gargalo de pressão”, que é a pressão necessária na última unidade de separação. Assim, nas operações de osmose reversa e nanofiltração se faz necessária a elevação da pressão na alimentação para superar o gargalo e as perdas de carga ao longo do processo, utilizando equipamentos adicionais para tal finalidade.

Certas bactérias podem deteriorar membranas celulósicas, necessitando realizar tratamentos que removam ou destruam tais bactérias. Alta temperatura também pode degradar diversas membranas, especialmente poliméricas, havendo a necessidade de trocadores de calor para adequar a temperatura.

4. CONCLUSÃO

Como se observa, ao fim das seis etapas de avaliação presentes neste protocolo, determina-se a estrutura básica do processo de separação por membranas que melhor atende o processo em que a separação seria inserida. Através do protocolo descrito acima, determina-se se a separação por membranas é aplicável, e caso seja qual dos processos de separação deve ser utilizado, é determinada a configuração dos equipamentos, é especificado o tipo de membrana a ser empregada, é determinado o módulo que melhor atende as necessidades do processo e também leva o leitor a uma análise quanto à necessidade de empregar equipamentos adicionais para contornar problemas operacionais.

A análise do processo de separação por membranas torna-se simplificada, uma vez que não há a necessidade de analisar uma grande quantidade de candidatos a processo de separação. Seguindo as etapas do protocolo o leitor necessitaria realizar a análise econômica e de dimensionamento de uma pequena quantidade de possíveis equipamentos para assim chegar à estrutura final do processo a ser aplicado, havendo assim economia de recursos e tempo na elaboração do projeto.

REFERÊNCIAS

- AL-AHMAD, M.; ALEEM, F. A. A.; MUTIRI, A.; UBAISY, A. **Biofouling in RO membrane systems part 1: Fundamentals and control**, Saudi Arabia, Conference on Membranes in Drinking and Industrial Water Production, Paris, 132 (1-3), 173-179, 2000.
- CABASSO, I. **Practical Aspects in the Development of a Polymer Matrix for Ultrafiltration. Ultrafiltration Membranes and Applications** (Editor Anthony R. Cooper), Springer, New York, 1980.
- CIANCI, F. C.; SILVA, L. F. M.; CABRAL, L. M. C. **Clarificação e concentração de suco de caju por processos com membranas**, Ciênc. Tecnol. Aliment., 25(3), 579-583, 2005.
- CHERYAN, M. **Ultrafiltration and Microfiltration Handbook**, 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton, 1998.
- EISENBERG, T.; MIDDLEBROOKS, J. **Reverse Osmosis Treatment of Drinking Water**, Butterworth, Boston, 1986.
- HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de separação por membranas**, E-papers, Rio de Janeiro, 2006.
- KOSINOV, N.; GASKON, J.; KAPTEIJN, F.; HENSEN, E. J. M. **Recent developments in zeolite membranes for gas separation**, Journal of Membrane Science 499, 65-79, 2016.
- LUCAS, C. S. **Medida de tamanho de poro em membrana de microfiltração utilizando técnica ultrassônica e redes neurais artificiais**, Dissertação de Mestrado, IEN, Rio de Janeiro, 2009.

MAGALHÃES, M. P.; GOMES, F. S.; MODESTA, R. C. D. **Conservação de água de coco verde por filtração com membrana**, Ciênc. Tecnol. Aliment., 25(1), 72-77, 2005.

MIERZWA, J. C.; SILVA, M. C. C.; RODRIGUES, L. D. B.; HESPANHOL, I. **Tratamento de água para abastecimento público: Avaliação comparativa através de custos diretos de implantação e operação com o Sistema convencional e convencional com carvão ativado**, Eng. Sanit. Ambient., 13 (1), 78-87, 2008.

HO, W.; SIRKAR, K. **Membrane Handbook**, Kluwer Academic, New York, 2001.

PABBY, A. K.; SASTRE, A. M. **State-of-the-art review on hollow fiber contactor technology and membrane-based extraction processes**, Journal of Membrane Science 430, 263-303, 2013.

PAUL, D. R.; YAMPOL'SKII, Y. P. **Polymeric gas separation membranes**, CRC Press, Boca Raton, 1994.

PORTER, M. C. **Concentration Polarization with Membrane Ultrafiltration**, Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev., 11 (3), 234-248, 1972.

PRUDICH, M. E.; CHEN, H.; GU, T.; GUPTA, R. B.; JOHNSTON, K. P.; LUTZ, H.; MA, G.; SU, Z. **Alternative Separation Processes**. Perry's Chemical Engineers' Handbook (editores D. W. Green e R. H. Perry), 8th ed., 36-71, New York, 2008.

REZAKAZEMI, M.; AMOOGHIN, A. E.; MONTAZER-RAHMATI, M. M.; ISMAIL, A. F.; MATSUURA, T. **State-of-the-art membrane based CO₂ separation using mixed matrix membranes (MMMs): An overview on current status and future directions**, Progress in Polymer Science, 39 (5), 817-861, 2014.

RIBAU-TEIXEIRA, M.; ROSA, M. J.; **Recuperação de água industrial utilizando**

tecnologia de membranas, Portugal, 1998, [Online]. Disponível em: https://sapientia.ualg.pt/bitstream/10400.1/11119/1/Artigo_Ribau%20and%20Rosa_Tomar.pdf. Acessado em: 16 de fevereiro de 2016.

ROBESON, L. M. **Correlation of separation factor versus permeability for polymeric membranes**, Journal of Membrane Science, 62(2), 165-185, 1991.

SABLANI, S. S.; GOOSEN, M. F. A.; AL-BELUSH, R.; WILF, M. **Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: a critical review**, Oceanside, 2001.

EVALUATION PROTOCOL ON THE USE OF MEMBRANES IN SEPARATION PROCESSES

ABSTRACT: *Facing the constant advance of industrial membranes and considering that competing separation methods have been consolidated for longer, although membranes are often discarded before a preliminary analysis, it is desired to create an evaluation protocol on the use of industrial membranes. This protocol aims to guide the reader to analyze the use of membranes in separation processes sequentially, thereby simplifying the evaluation and promoting economic and time savings. To create the protocol, an extensive literature review was conducted, collecting necessary information to conduct the design of the separation process with membranes, thus providing information stepwise, and sometimes presenting flowcharts to elucidate the steps arrangement. The final protocol has been proposed, allowing building, in only six steps, the basic structure of a separation process that can be a good candidate to any desired operation.*

KEYWORDS: Unit operations; Filtration; Membrane Separation; Industrial processes.